

逆系统方法在区域经济与人口、环境协调发展中的应用研究 *

董文波 许加枫 米 红

(厦门大学自动化系, 厦门, 361005)

【摘 要】 本文以我国区域资源环境人口的综合协调为目标, 阐述了我国一些地区目前发展中所存在的问题, 并以福建省为案例, 将逆系统方法引入了到福建省资源环境人口的协调发展系统之中, 并应用灰色预测模型建模, 探索了逆系统方法在区域可持续发展预测中的应用。

【关键字】 逆系统 非线性 协调发展 灰色预测模型

1 引言

非线性现象是在工程、自然界以及人类社会活动的各个领域普遍存在的问题, 因此非线性控制一直在控制科学中占有重要地位。在资源环境人口综合协调系统中, 整个系统涉及到的变量很多, 比如有关人口的出生率、死亡率、人口分布等, 有关环境的人均废水排放量、空气污染指数等, 而且这些变量之间又相互依存, 对于这多维的相关变量用线性预测方法是很难建立准确的模型的, 针对这样复杂的社会经济系统, 本文引用了一种新的方法——逆系统方法, 来研究福建省资源环境人口综合协调系统。目前逆系统方法得到了非常广泛的应用: 1、在力学系统中, 例如机械手和卫星姿态控制; 2、在工业过程中, 例如复杂二容液位系统的控制; 3、在电力系统中, 例如发电机组的控制。可以看出, 逆系统方法主要还是应用在自然工程和技术科学方面, 而且所研究的问题都有固定的模型或模型很容易导出, 而且问题本身也比较具体, 这就可以使研究有的放矢。在本文中, 我们将探索逆系统方法在社会发展这个大系统中的应用。我们知道, 一个国家、一个省, 它在人口、资源、环境、经济等方面的发展都是非常难预测的, 这是一个非常复杂、不稳定的系统, 本文将利用逆系统方法对未来 20 年福建省的发展作出相应预测, 力求消除其中的不稳定因素, 使预测结果更加准确。

人口、资源、环境与经济协调发展的可持续发展系统观是从联系的观点来看问题的, 即人口、资源、环境与经济发展都不是完全独立的系统或变量; 恰恰相反, 彼此之间有着很密切的联系。毫无疑问, 持续的经济增长和经济发展是在一定的人口、资源、环境条件下实现的。若经济、人口、资源、环境四者之间相互促进、协调, 其失调和障碍因素被控制在最小限度和范围内, 则该系统将呈现良性的循环和可持续性发展; 若四者之间基本失调, 已危及或破坏了整个系统的常态运行, 则称之为恶性循环和不可持续性发展。同时, 资源、环境、人口与经济四者之间又是一个既矛盾又统一的整体, 从系统论的角度分析, 由资源、环境、人口与经济组成的这样一个大系统的平衡是相对的, 不平衡则是绝对的、长期的。但该系统的失衡必须控制在系统的生态自净能力以内, 这样才能保持整个系统的综合协调和可持续发展。否则, 将对经济和社会构成较大危害。因此, 福建省资源环境人口综合协调和可持续发展系统还应将台湾和其它周边省、市的资源协同起来, 互利互惠, 才能得到最佳的或满意的目标。否则将发生区域间制约作用, 而不能走向良性循环。

如何建立一个资源人口环境经济协调发展的大系统是我们急需解决的问题。有关这方面的预测以前也曾做过, 但这种预测仅仅是根据往年的数据, 通过一些统计软件进行的比较粗略的预测, 它所给出的预测结果的误差比较大。对于数据的完备性和准确性要求比较高, 整个预测过程对数据的依赖性很大。这种预测方法只是通过一些历史数据, 再借助于一些统计

软件, 比如 spss 等, 对未来的发展做出一些比较粗略的预测, 在预测过程中还加入了很多人的因素, 因此, 预测结果的误差比较大。这种通过历史数据直接预测未来的方法属于正向的思维模式, 在这里我们采用一种逆处理非线性预测的方法, 即系统逆处理预测。目前人们对复杂系统的内在机制还缺乏深入细致的了解, 直接建立非线性模型尚有困难, 按照逆向思维的方式, 我们不妨考虑以下它的逆问题, 即从包含着系统大量信息的有限长的时间序列出发, 依据一定的规律性和技术方法构造出系统的非线性映射, 以此为理论依据, 对系统的行为进行预测。我们所用到的逆系统方法就是这样一种思维模式。

2 逆系统思想应用的探索

如何把逆系统的思想应用在福建省人口、资源、环境与经济的协调发展中, 是我们所关心的问题。简单地讲, 逆系统的已知部分不再是我们所熟悉的输入和状态, 而是输出部分, 这是它不同于一般系统的地方。在逆系统中, 输出已知, 而输入和状态未知或是部分已知, 这就要求我们在输出已知的情况下通过逆系统的方法确定出系统的输入和状态, 达到我们对未来的预测。我们所研究的福建省人口资源环境与经济的协调发展问题, 输出是已知的。在未来的二十年中, 希望福建省的发展状况能够达到一个比较具体的模式, 为此, 我们选择西方七国人均 GDP 在 5000 美元—10000 美元时所处的发展状态作为福建省协调发展系统的输出。具体地说就是将西方七国发展到这个状态时所对应的指标值 (比如人均二氧化碳排放量、人均土地占有面积、人口出生率等) 作为福建省未来发展中对应指标所应达到的目标。确定了输出, 可以选择适当的模型 (比如双线性模型、灰色预测模型等) 针对人口资源环境与经济各个子系统建立适当的模型, 在模型建立的基础上利用逆系统方法确定整个系统的输入和状态, 预测未来二十年福建省协调发展的最佳模式。

可以用算子的概念将一个系统看作一个由输入映射到输出的算子。记 $u \rightarrow y$ 为一个给定的系统 (线性的或非线性的), 对于 $t \geq t_0$, 其输入为 $u(t)$, 输出为 $y(t)$, 并具有一组确定的初始条件或初始状态, 记为 $x(t_0) = x_0$ 。该系统的输出 $y(t)$ ($t \geq t_0$) 完全由初值和输入确定, 令描述因果关系的算子为 Δ , 则有:

$$y(\otimes) = [\Delta x_0, u(\otimes)]。或简写为 y = \Delta u \quad (1)$$

2.1 逆系统

首先引入一个与求逆问题中输入 $u(\otimes)$ 的存在性有关的问题。

定义 1、设 Δ 为另一个系统, 具有初始状态为 $x(t_0) = x_0$ (其数值一般由 x_0 确定) 表示其传递关系的算子为 $\Delta: y_d \rightarrow u_d$, 其中 $y_d(t)$ 为取值于某个域中的任意给的 n 阶可微函数 (n 为系统的阶数), 并且 $y_d(t)$ 在 t_0 处需满足一定的初始条件 (其数值一般由 x_0 确定)。如果算子 Δ 满足下式

$$\Delta^{\wedge} y_d = \Delta^{\wedge} u_d = y_d \quad (2)$$

* 本文是福建省自然科学基金项目 (D0210003) 资助的一部分。

则称系统 为系统 的逆系统。相应地,系统 称为原系统。

2.2 阶积分逆系统

定义 2、设 为又一个系统,具有初始状态为 $x(t_0) = x_0$ (其数值一般由 x_0 确定)。表示其传递关系的算子为 Δ : u , 其中 为取值于某个域中的任给的连续函数。若取 $u = y_d^{(r)}$ (r), 则下式成立

$$\Delta^r (D y_d = \Delta^r u = y_d \quad (D = d/dt)) \quad (3)$$

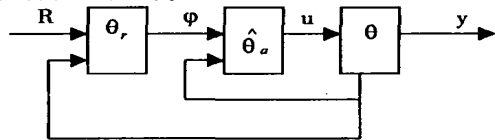
则把系统 称为系统 的 r -阶积分逆系统。相应地,系统 称为原系统。

2.3 伪线性系统

定义 3、由 r -阶积分逆系统与原系统一起构成的满足方程: $\Delta^r D y =$ 的复合系统 Δ^r , 被称为伪线性系统。

我们将 Δ^r 所表示的系统叫做伪线性系统,是因为一方面这个系统的输入输出是线性的,而另一方面系统的内部结构却可能仍然是非线性关系。

伪线性系统 Δ^r 可用图 1 所示的结构表示。显然,系统变为伪线性系统 Δ^r 后,便可按人们熟知的线性控制理论来完成闭环控制系统的设计。



图(1)

2.4 逆系统方法原理

一般地,可以根据问题的性质设计一个系统的逆系统,及它的设计方法,然而它们之间具有某些共性,可以把它们抽象出来,用大致相同的方法去设计出一个轮廓。当然,具体问题仍需具体分析,下面归纳出逆系统方法的概括性的设计原理,大致分为四步:

根据原系统 求出其逆系统 ,并同时确定其初值 x_0 。

由 进一步求出相应的 r -阶积分逆系统 ,并同时确定其初值 x_0 。

由 与 一起构成伪线性系统 ,并将其实现为尽可能简化的和采用反馈结构的等价形式。即并非简单地将 放在 之前,而是要根据 x_0 和 x_0 之间的关系,将 中可由 的状态直接决定的那一部分状态量直接由 中的状态反馈回来并产生之。

将上述具有反馈结构的伪线性系统作为被控对象,根据设计目标,按线性系统的方法设计出所要求的控制系统。

为了应用逆系统方法进行预测和控制,我们根据社会系统的复杂性和不确定性,选择灰色预测模型进行建模。这里主要采用 GM(1, N) 模型。

2 GM(1, N) 模型:

凡是信息不完全确知的系统,都可称为灰色系统。GM(1, N) 模型的白化微分方程形式是:

$$\frac{dx_1^r}{dt} + ax_1^r = b_1 x_2^r + b_2 x_3^r + \dots + b_{N-1} x_N^r \quad (4)$$

式中 $x_i^r = \{x_i^r(1), x_i^r(2), \dots\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 是数据序列 x_i^0 经 r 次累加生产后的生成序列,序列 r 次累加的计算公式是

$x_i^r(m) = \sum_{j=1}^m x_i^{r-1}(j)$ (一般 $r \leq 3$) 表示数据序列的 r 次累加

$m = 1, 2, 3, \dots$ 表示序列号

r 是序列累加次数,计算时由试算结果确定

x_1 是要估算的变量

x_2, x_3, \dots 是与估算变量有关的说明性变量

x_x 是序列的 r 次累加均值

用最小二乘法由原始数据估计 GM(1, N) 白化微分方程的结构参数 (a, b_1, \dots, b_{N-1}) , 记

$$y_N = \begin{bmatrix} x_1^{r-1}(2) \\ x_1^{r-1}(3) \\ \vdots \\ x_1^{r-1}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1^r(1) + x_1^r(2) \end{bmatrix} & x_2^r(2) & \dots & x_N^r(2) \\ -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1^r(2) + x_1^r(3) \end{bmatrix} & x_2^r(3) & \dots & x_N^r(3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1^r(n-1) + x_1^r(n) \end{bmatrix} & x_2^r(n) & \dots & x_N^r(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\hat{a} = [a, b_1, \dots, b_{N-1}]^T$$

GM(1, N) 模型可写成

$$y_N = B \hat{a} \quad (6)$$

对矩阵 B 进行奇异值分解,得 $B = U \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T$ (7)

利用奇异值分解式得矩阵 B 的广义逆 B^+ , 然后利用 B^+ 求出 GM(1, N) 模型的最小二乘解:

$$\hat{a} = B^+ y_N \quad (8)$$

求出 \hat{a} 后,可得到微分方程的解:(微分方程的离散解)

$$x_1^r(k+1) = \begin{bmatrix} x_1^{r-1}(1) - \sum_{i=2}^N \frac{b_i - 1}{a} x_i^r(k+1) \\ \otimes e^{-ak} + \sum_{i=2}^N \frac{b_i - 1}{a} x_i^r(k+1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过微分方程的通解方程确定逆系统的方程:

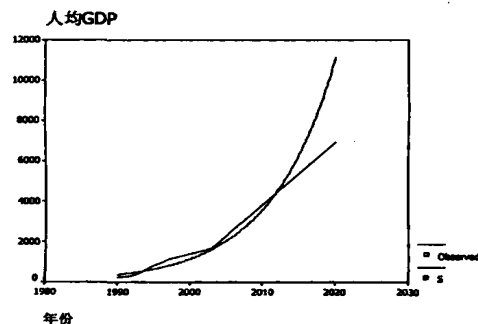
$$x_i^r(k+1) = \left(1 - e^{-ak}\right) \sum_{i=2}^N \frac{b_i - 1}{a} = x_1^r(k+1) - x_1^{r-1}(1) e^{-ak}$$

式中, $k = 0, 1, 2, \dots$ 表示序列参数; r 是序列累加次数,含义同上。以上就建立了初始 GM(1, N) 模型。模型估算值经累减还原得出初始估算值。

3 福建省经济与人口、环境协调发展的系统仿真

3.1 系统模型

为了建立经济与人口、环境协调发展的系统模型,首先要选取比较有代表性的指标,我们可选人均 gdp、人口增长率、人均绿地。为了应用逆系统的方法,必须确定输出的状态,即 $y^1(k+1)$ 的值。在确定人均 gdp 的值时,可以参照西方七国聚类后的数据以达到可持续发展的目的。



图(2)

根据西方七国聚类后的数据,利用 SPSS 可得:

$$Y = e^{(b_0 + b_1/x)}$$

其中 $b_0 = 236.345$, $b_1 = -458606$; 经计算得到 2004 到 2020 年福建省人均 gdp 的值为:

1807 2026 2271 2545 2851 3195 3579 4009 4490
4787 5021 5324 5560 5978 6250 6647 6918

假设: y - 人均 gdp (美元), x_1 - 人口增长率 (1/1000), x_2 - 人均绿地 (公顷/人)。

应用 GM(1,N) 模型建模,首先要选择一数据序列,1997 年到 2003 年的数据作为一序列,其中由于人均 gdp 的值我们已经得到,可以将其全部列出,如下:

$$y^0 = [1109, 1216, 1304, 1401, 1493, 1577, 1706, 1807, 2026, 2271, 2545, 2851, 3195, 3579, 4009, 4490, 4787, 5021, 5324, 5560, 5978, 6250, 6647, 6918]$$

$$x_1^0 = [6.32, 5.33, 5.21, 5.75, 6.04, 6.11, 6.22]$$

$$x_2^0 = [6.05, 6.50, 7.02, 7.25, 7.70, 8.10, 8.50]$$

利用 $x = x_i / x_{\max}$, 将上述数据标么化并累加得:

$$y^1 = [0.1603, 0.3361, 0.5246, 0.7271, 0.9429, 1.1709, 1.4175]$$

$$x_1^1 = [1.0000, 1.8434, 2.6677, 3.5775, 4.5332, 5.5000, 6.4842]$$

$$x_2^1 = [0.7118, 1.4765, 2.3024, 3.1553, 4.0612, 5.0141, 6.0141]$$

将上述数据代入方程(5)、(6)可得:

$$\begin{bmatrix} 0.1785 \\ 0.1885 \\ 0.2025 \\ 0.2158 \\ 0.228 \\ 0.2466 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2482 & 1.8434 & 1.4765 \\ -0.4804 & 2.6677 & 2.3024 \\ -0.6259 & 3.5775 & 3.1553 \\ -0.835 & 4.5332 & 4.0612 \\ -1.0569 & 5.5 & 5.0141 \\ -1.2942 & 6.4842 & 6.0141 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由 Matlab 计算可得参数 a, b_1, b_2 的值,如下:

$$[a, b_1, b_2] = [1.4080, 0.0393, 0.3001] \quad (12)$$

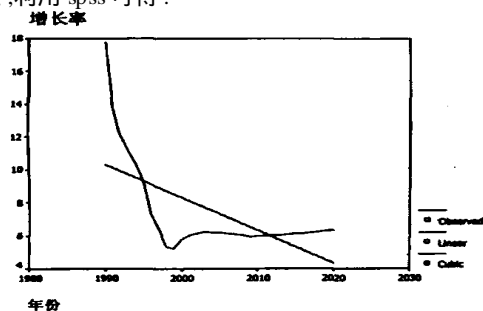
将(12)代入(10),经计算可得:

$$\begin{bmatrix} x_1^1(k+1) & x_2^1(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.28 & 6.8 \\ 6.24 & 7.3 \\ 6.2 & 8.4 \\ 6.15 & 8.8 \\ 6.09 & 9.1 \\ 6.01 & 11.3 \\ 6.03 & 11.7 \\ 6.06 & 11.9 \\ 6.09 & 12.1 \\ 6.11 & 12.6 \\ 6.14 & 13.2 \\ 6.18 & 13.7 \\ 6.21 & 14.2 \\ 6.25 & 14.8 \\ 6.28 & 15.4 \\ 6.33 & 15.9 \\ 6.38 & 16.7 \end{bmatrix} \quad (13)$$

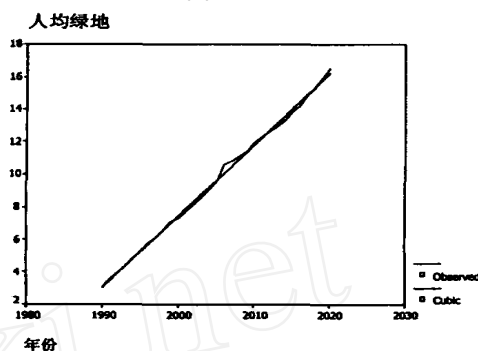
将上述累加数据依次累减并还原后可得:

$$\begin{bmatrix} x_1^0(k+1) & x_3^0(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.2 & 9 \\ 6.17 & 9.5 \\ 6.13 & 10.6 \\ 6.08 & 10.8 \\ 6.02 & 11.1 \\ 5.94 & 11.2 \\ 5.96 & 11.4 \\ 5.99 & 11.6 \\ 6.02 & 11.9 \\ 6.04 & 12.3 \\ 6.07 & 12.6 \\ 6.11 & 12.9 \\ 6.14 & 13.3 \\ 6.18 & 13.8 \\ 6.22 & 14.2 \\ 6.26 & 14.8 \\ 6.31 & 15.4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)所示的数据即为 2004 年到 2020 年人口增长率和人均绿地的预测值,利用 spss 可得:



图(3)



图(4)

表 1、人口增长率和人均绿地的预测值:

年份	增长率	人均绿地
2004	6.2	9
2005	6.17	9.5
2006	6.13	10.6
2007	6.08	10.8
2008	6.02	11.1
2009	5.94	11.4
2010	5.96	11.9
2011	5.99	12.3
2012	6.02	12.6
2013	6.04	12.9
2014	6.07	13.3
2015	6.11	13.8
2016	6.14	14.2
2017	6.18	14.8
2018	6.22	15.4
2019	6.26	15.9
2020	6.31	16.5

通过以上的计算分析可以看出,从 1990 年开始,由于国家加强了计划生育的力度和“三为主”、“三结合”、“少生快富奔小康”等举措的实施,推动了生育率的快速下降。到 2000 年人口增长率基本趋于稳定,计划生育已深入人心,取得了非常显著的成果。随着我国就业问题和老龄化问题的加重,计划生育政策会逐步放开,但由于我国人口基数大,人口增长率还是会基本平稳,不会有太大起伏。由图(3)可以看出,福建省当前的生育水平可以维持到 2010 年不变,然后逐渐上升至 2020 年,总和生育率可以达到 2.0。同时人均绿地也会逐步增加,即在经济不断发展的情况下,环境保护与建设也要不断加强,以达到可持续发展。按照上述模式,福建省未来二十年可以在经济不断发展的基础上,达到人口和环境的协调发展。

3.2 相关性分析

表 2 福建省 1996 - 2003 年各代表性指标的原始数据

年份	人均 gdp (美元)	人均 绿地 (公顷/人)	人口自然 增长率 (1/1000)
1996	965	5.72	7.28
1997	1109	6.05	6.32
1998	1216	6.50	5.33
1999	1304	7.02	5.21
2000	1401	7.25	5.75
2001	1493	7.70	6.04
2002	1577	8.10	6.11
2003	1706	8.50	6.22

表 3 福建省 2004 - 2020 年各代表性指标的预测数据

年份	人均 gdp (美元)	人均绿地 (公顷/人)	人口自然增 长率 (1/1000)
2004	1807	9.0000	6.2000
2005	2026	9.5000	6.1700
2006	2271	10.6000	6.1300
2007	2545	10.8000	6.0800
2008	2851	11.1000	6.0200
2009	3195	11.4000	5.9400
2010	3579	11.9000	5.9600
2011	4009	12.3000	5.9900
2012	4490	12.6000	6.0200
2013	4787	12.9000	6.0400
2014	5021	13.3000	6.0700
2015	5324	13.8000	6.1100
2016	5560	14.2000	6.1400
2017	5978	14.8000	6.1800
2018	6250	15.4000	6.2200
2019	6647	15.9000	6.2600
2020	6918	16.5000	6.3100

表 4 相关度表(预测年度 2004 - 2020)

具有显著性的相关指标名称 (已做无量纲处理)	相关系数
人均 GDP 与人均绿地	0.990 **
人均 GDP 与人口增长率	0.447 *
人均绿地与人口自然增长率	0.460 *

* * 在 0.01 统计水平上具有显著性

* 在 0.01 统计水平上具有显著性

参考文献

- [1] 李春文、冯元琨。多变量非线性控制的逆系统方法。北京：清华大学出版社，1991。
- [2] 牛文元。中国 21 世纪“可持续发展”的预测。中国科学院，1995。
- [3] 杜继宏、陆燕、冯元琨等。逆系统方法和线性系统解耦控制。中国科学技术出版社，1995。
- [4] A design method of feed - forward control based on inverse system. Neural Networks, 1991. 1991 IEEE International Joint Conference on, 18 - 21 Nov. 1991
- [5] Communication by chaotic signals: the inverse system approach.
- [6] Feldmann, u. Hasler, M. Schwarz, W. ,Circuits and Systems, 1995. ISCAS 95. 1995 IEEE International Symposium.

各数据在进入相关分析之前,均作了无量纲化处理,以消除单位不一致的影响。经过相关分析,我们得到表 4。由表 4 可知,在未来的 17 年内,人均 GDP、人均绿地面积以及人口自然增长率之间均具有显著的两两相关关系。人均 GDP 与人均绿地之间表现出正强相关,说明了随着经济发展,人们日益重视环境保护问题,努力建设绿色环保的生活环境。相关系数 0.990,在 0.01 的水平上具有统计显著性,说明了人均 GDP 每增长 10%,将带来人均绿地面积 9.9% 的增长。人均 GDP 与人口自然增长率之间呈现中度正相关,相关系数为 0.447。这说明经济增长和人民生活富足,对于人口增长仍具有刺激作用。比较这两个相关系数,我们发现一个值得注意的现象,在人口增长与生活质量发生冲突时,人们显然将倾向于选择高质量的生活,这体现在人居环境建设的增长上,而对于人口增长的需求似乎就不那么迫切。人均绿地面积与人口自然增长率之间也表现出了中度正相关。这从一个侧面反映了福建省未来 17 年内人地关系的矛盾。人口增长,显然对于居住用地的需求就增加,对于生活环境中用于绿化环保的土地面积的需求必然增加。但是,绿化用地的增长显然不足以满足增长的人口口的要求。这将是 21 世纪初期福建省在人口与环境方面必须重视和解决的矛盾之一。

4 结束语

逆系统方法在自然工程科学和技术科学方面得到了广泛的应用,并且取得了比较满意的效果。在社会科学和经济方面,逆系统方法同样有着举足轻重的作用。本文正是将逆系统方法的思想应用在福建省经济与人口环境的协调发展系统中。经济预测中有很多不同的预测方法,但大部分方法都比较粗略,存在着较大的误差;而逆系统方法在模型确定的基础上,利用严密的数学推导,最终做出比较准确的预测。并由此得出以下三点建议:

- 1) 控制人口数量,提高人口素质,改善人口结构,调整人口分布,协调区域经济、人口与环境的关系是要以实现由依赖“自然资源开发型”向依赖“人力资源开发型”的经济发展模式的核心来转变。
- 2) 依靠科技进步和促进人口、环境与经济的协调发展。尤其是在保持较高的经济增长速度的同时,一定要增加科技的投入量,加强环境保护高新应用技术的研究和开发。
- 3) 科学的区域发展规划是协调人口、环境与经济关系的保障。要以逆系统的思维方法,科学的区域发展规划为目标,运用逆向仿真的技术和手段,筹划和提炼不同区域经济发展水平下的经济与环境、人口的最佳关联时序模式,为协调区域经济与资源环境人口的可持续发展奠定坚实的技术支撑平台。